

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر

بررسی اسلوب چقرمگی و سینتیک تخریب حرارتی فداشونده‌های نانوکامپوزیتی بسیار پرشده با خاک رس

آذین پیدایش

استاد راهنما :

دکتر مهرداد کوبی

استاد مشاور:

دکتر احمدرضا بهرامیان

اسفندماه ۱۳۷۸

پیشگفتار

برای حفاظت حرارتی سامانه‌های برگشت‌پذیر به جو زمین در برابر شوک‌های حرارتی ناگهانی که هنگام برخورد با جو زمین با آن مواجه می‌شوند، معمولاً از کامپوزیت‌های فداشونده استفاده می‌شود. این عایق‌های فداشونده می‌بایست خواص مکانیکی و حرارتی ویژه‌ای را دارا بوده، به راحتی قابل فرایند و ساخت باشند. در سال‌های اخیر با ظهور نانو فناوری، محققان بهبود خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌های پلیمری را در مقایسه با کامپوزیت‌های سنتی نشان داده‌اند. علاوه بر این افزایش کارایی فداشوندگی نانوکامپوزیت‌های پلیمری در مقایسه با کامپوزیت‌ها، به طور ویژه توسط Vaia در سال ۱۹۹۹، Koo در سال ۲۰۰۳ و بهرامیان در سال ۲۰۰۶ بررسی و گزارش شد. بهرامیان نشان داد که با افزایش میزان خاک‌رس نانوکامپوزیت آزبست- فنولیک- مونت‌موریلونیت، کارایی فداشوندگی افزایش می‌یابد که همین گزارش، زیربنای اصلی این تحقیق بوده، سعی شده است با بارگذاری خاک‌رس تا بیشترین حد ممکن در کامپوزیت آزبست- فنولیک، صحت و سقم این نتیجه در نانوکامپوزیت‌های بسیار پرشده با خاک‌رس بررسی شود. اما به نظر می‌رسد با افزایش میزان خاک‌رس، در نمونه‌های نانوکامپوزیتی، احتمالاً نمونه‌ها ترد و شکننده شده، با کاهش خواص مکانیکی از جمله چقرمگی آنها روبرو شویم. بدین ترتیب بررسی میزان چقرمگی و اسلوب چقرمگی نانوکامپوزیت‌های بسیار پرشده، از جمله موارد مورد توجه دیگر در این تحقیق به حساب می‌آید. برای رفع مشکل احتمالی کاهش چقرمگی، از اصلاح سامانه رزین با پلیمرهایی نظیر NBR، PVB و HTPB استفاده می‌شود.

مورد قابل تأمل دیگر در این تحقیق، ارائه مدلی برای بررسی رفتار فداشوندگی نانوکامپوزیت‌ها، به منظور تعیین ضخامت بهینه عایق است. شایان ذکر است که تاکنون هیچ‌گونه مدلی برای فداشدن نانوکامپوزیت‌ها ارائه نشده است و اهم مدل‌های ارائه شده، مربوط به فداشدن کامپوزیت‌های پلیمری است. رویکرد اصلی در این تحقیق برای مدلسازی فداشدن نانوکامپوزیت‌ها، بررسی سینتیک تخریب حرارتی و خواص گرمایی- فیزیکی نانوکامپوزیت‌های بسیار پرشده در دماهای بالا و جایگزینی این خواص در مدل ارائه شده توسط بهرامیان برای کامپوزیت‌ها است.

چکیده

بازگشت موفقیت آمیز دستگاههای پرنده هوافضایی به جو زمین بستگی زیادی به حفاظت حرارتی سازه آنها در برابر گرمایش آیرودینامیکی دارد که برای این کار استفاده از عایقهای حرارتی غیرفعال، به ویژه کامپوزیتهای فداشونده زغال گذار نسبت به دیگر روشها موثرتر و به صرفه تر است. اما ظهور برخی محدودیتها و مشکلات در عملکرد کامپوزیتهای فداشونده موجب گرایش محققان به سامانههای جدید حفاظت حرارتی شده است. از جمله این محدودیتها می توان به ضعیف بودن ساختار زغال ایجاد شده اشاره کرد. بنابراین زغال به راحتی دچار خوردگی مکانیکی شده، پسروی سطح عایق سریعتر صورت می گیرد. به عبارت دیگر با کاهش ضخامت عایق، زمان عملکرد عایق کاهش می یابد. بدین ترتیب، مواد جدیدی از جمله نانوکامپوزیت های فداشونده توسط محققان پیشنهاد شده است.

نانوکامپوزیت های پلیمری، بویژه نانوکامپوزیت های بسیار پرشده با خاک رس، خواص مکانیکی و گرمایی جالب توجهی را نشان می دهند.

در این تحقیق پس از ساخت نانوکامپوزیت های بسیار پرشده با خاک رس، خواص مکانیکی، بویژه چقرمگی شکست و نیز خواص حرارتی و فداشوندگی نانوکامپوزیت های حاصل، به منظور کاربرد در سپر حرارتی موشک، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این به منظور بهبود خواص مکانیکی، از روش آمیخته کردن زمینه پلیمری گرماسخت با دیگر پلیمرهای گرماسخت و لاستیکی استفاده شده است. همچنین به منظور تعیین ضخامت بهینه عایق های فداشونده نانوکامپوزیتی، سعی شده با اصلاح ضرایب مدل فداشدن کامپوزیت های فداشونده، رفتار فداشوندگی سپرهای حرارتی نانوکامپوزیتی، مدل شود.

آزمون های تحلیل خواص مکانیکی، افزایش استحکام، مدول و میزان خمش در شکست بسیار خوبی را برای نانوکامپوزیت های بسیار پرشده در مقایسه با کامپوزیت نشان می دهند. همچنین بهبود در چقرمگی نانوکامپوزیت های بسیار پرشده مشاهده شده که ناشی از شکل پولکی سیلیکات های لایه ای و استحکام بالای صفحات خاک رس در برابر رشد ترک است.

نانوکامپوزیت های بسیار پرشده برپایه آمیخته رزین فنولیک با پلی وینیل بوتیرال، NBR و HTPB، استحکام و مدول و خواص حرارتی بهتری را نسبت به کامپوزیت نشان می دهند که بهترین نتایج مربوط به آمیخته فنولیک با HTPB است.

نتایج حاصل از تحلیل های حرارتی نیز، بهبود ۱۳۰ درصدی پایداری حرارتی، کاهش ۱۳۶ درصدی سرعت سایش و کاهش ۳۰۰ درصدی دمای پشت نانوکامپوزیت های بسیار پرشده، نسبت به کامپوزیت را به نمایش گذاشته است.

بررسی سینتیک تخریب حرارتی و خواص گرمایی- فیزیکی نانوکامپوزیت های بسیار پرشده در دماهای بالا (تا 1400°C) و بازبینی مدل فداشدن کامپوزیت، مدل سازی فداشدن نانوکامپوزیت های بسیار پرشده، برای تعیین دمای پشت را به ارمغان داشته است.

واژه های کلیدی: فداشوندگی حرارتی، سپر حرارتی نانوکامپوزیتی، نانوکامپوزیت بسیار پرشده، سینتیک تخریب حرارتی، مدل سازی، چقرمگی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول نظری	
۱-۱ تعریف مساله	۱
۲-۱ کامپوزیت های فداشونده	۴
۱-۲-۱ مروری بر تحقیقات انجام شده	۷
۳-۱ نانوکامپوزیت های فداشونده	۱۱
۱-۳-۱ مروری بر تحقیقات انجام شده	۱۳
۴-۱ نانوکامپوزیت های پلیمر- سیلیکات های لایه ای	۱۵
۱-۴-۱ ساختارهای مختلف نانوکامپوزیت های پلیمر- خاک رس	۱۸
۲-۴-۱ روش های ساخت نانوکامپوزیت های پلیمر خاک رس	۲۰
۵-۱ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ها	۲۱
۱-۵-۱ مدول	۲۱
۲-۵-۱ استحکام	۲۱
۳-۵-۱ ازدیاد طول در شکست	۲۲
۴-۵-۱ چقرمگی	۲۲
۶-۱ چقرمگی	۲۲
۱-۶-۱ اثر نانوسیلیکات های لایه ای بر چقرمگی شکست پلیمرها	۲۳
۱-۶-۱-۱ نوع خاک رس	۲۳
۲-۶-۱-۱ میزان بارگذاری خاک رس در زمینه پلیمری	۲۴
۳-۶-۱-۱ دمای کارکرد	۲۵
۴-۶-۱-۱ میزان پراکنش خاک رس در زمینه پلیمری	۲۶
۵-۶-۱-۱ ریخت و چگونگی پراکنش خاک رس در زمینه پلیمری	۲۷
۷-۱ خواص حرارتی نانوکامپوزیت ها	۲۷

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۸-۱ نانوکامپوزیت‌های بسیار پرشده با خاک رس	۲۹
۹-۱ مدل‌سازی	۳۳
۱-۹-۱ مدل‌سازی فداشدن نانوکامپوزیت‌ها	۳۵
۲-۹-۱ رفتار گرمایی - فیزیکی در درجه حرارت‌های زیاد	۳۹
۳-۹-۱ مدل سینتیکی تخریب حرارتی	۴۰

فصل دوم تجربی

۱-۲ مواد	۴۶
۱-۱-۲ رزین فنولیک، نوع رزول	۴۶
۲-۱-۲ لاستیک اکریلونیتریل بوتادی ان (NBR)	۴۶
۴-۱-۲ رزین پلی وینیل بوتیرال	۴۷
۵-۱-۲ الیاف آزبست	۴۸
۶-۱-۲ مونت‌موریلونیت	۴۸
۷-۱-۲ الکل اتیلیک	۴۹
۸-۱-۲ متیل اتیل کتون (MEK)	۴۹
۹-۱-۲ مواد پخت NBR و HTPB	۴۹
۲-۲ روش تهیه نمونه‌ها	۴۹
۱-۲-۲ روش تهیه نمونه‌های کامپوزیتی	۴۹
۲-۲-۲ روش تهیه نمونه‌های نانوکامپوزیتی بر پایه رزین فنولیک	۵۰
۳-۲-۲ روش تهیه نمونه‌های نانوکامپوزیتی بر پایه سامانه رزین اصلاح شده	۵۰
۴-۲-۲ روش پخت نمونه‌ها	۵۲
۵-۲-۲ فرآیند پخت	۵۵
۳-۲ فرمول‌بندی نمونه‌های آزمون	۵۷
۴-۲ آزمون‌ها	۵۹

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵۹.....	۲-۴-۱ آزمون های تعیین حد بالای بارگذاری خاک رس
۵۹.....	۲-۴-۱-۱ اندازه گیری چگالی
۵۹.....	۲-۴-۱-۲ آزمون سوختن
۵۹.....	۲-۴-۲ آزمون های شناسایی
۵۹.....	۲-۴-۲-۱ آزمون XRD
۵۹.....	۲-۴-۲-۲ آزمون میکروسکوپ الکترونی
۶۰.....	۲-۴-۳ آزمون میکروسکوپ نوری
۶۰.....	۲-۴-۳ آزمون های تحلیل مکانیکی
۶۱.....	۲-۴-۴ آزمون های تحلیل حرارتی
۶۱.....	۲-۴-۵ اندازه گیری ظرفیت حرارتی ویژه
۶۱.....	۲-۴-۶ آزمون شعله اکسی استیلن
۶۲.....	۲-۴-۶-۱ آزمون اندازه گیری سرعت سایش
۶۲.....	۲-۴-۶-۲ آزمون اندازه گیری درجه حرارت در ضخامت عایق

فصل سوم نتایج و بحث

۶۵.....	۳-۱ مقدمه
۶۵.....	۳-۲ ارزیابی بیشترین میزان بارگذاری خاک رس
۶۶.....	۳-۲-۱ مشاهدات حین ساخت
۶۶.....	۳-۲-۲ میزان حضور خاک رس در نانوکامپوزیت های بسیار پرشده
۶۶.....	۳-۲-۲-۱ اندازه گیری چگالی نانوکامپوزیت های بسیار پرشده با خاک رس
۶۷.....	۳-۲-۲-۲ درصد فاز جامد در نانوکامپوزیت های بسیار پرشده با خاک رس
۶۸.....	۳-۳ ارزیابی ساختار نانوکامپوزیت های بسیار پرشده
۷۰.....	۳-۳-۱ ارزیابی ساختار نانوکامپوزیت های بر پایه رزین فنولیک
۷۰.....	۳-۳-۲ ارزیابی ساختار نانوکامپوزیت های بر پایه سامانه رزین اصلاح شده
۷۲.....	۳-۴ ارزیابی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های بسیار پرشده

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱-۴-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های بر پایه رزین فنولیک	۷۲
۲-۴-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های بر پایه سامانه رزین اصلاح شده	۷۶
۱-۲-۴-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ۷۰phr اصلاح شده با پلی وینیل بوتیرال	۷۶
۲-۲-۴-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ۷۰phr اصلاح شده با اکریلونیتریل بوتادی‌ان	۷۹
۳-۲-۴-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ۷۰phr اصلاح شده با پلی بوتادی‌ان هیدروکسیله شده	۸۱
۴-۲-۴-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ۵۰ phr اصلاح شده	۸۴
۵-۳ ارزیابی اسلوب چقرمگی نانوکامپوزیت‌های بسیار پرشده	۸۶
۶-۳ ارزیابی خواص حرارتی نانوکامپوزیت‌های بسیار پرشده با خاک رس	۹۰
۱-۶-۳ خواص حرارتی نانوکامپوزیت‌های بسیار پرشده بر پایه رزین فنولیک	۹۰
۲-۶-۳ خواص حرارتی نانوکامپوزیت‌های بسیار پرشده بر پایه سامانه رزین اصلاح شده	۹۲
۷-۳ مقایسه خواص و انتخاب بهترین نمونه‌ها	۹۴
۸-۳ کارایی فداشدن	۹۵
۱-۸-۳ اندازه گیری توزیع دما در ضخامت عایق	۹۵
۲-۸-۳ مشاهده و ارزیابی نمونه های پس از فداشدن	۹۹
۹-۳ پارامترهای موثر بر فداشوندگی	۱۰۴
۱-۹-۳ رفتار تخریب حرارتی	۱۰۴
۲-۹-۳ گرمای فداشدن	۱۰۴
۳-۹-۳ پارامترهای سینتیک تخریب حرارتی	۱۰۵
۴-۹-۳ خواص گرمایی - فیزیکی	۱۱۲
۱۰-۳ مدلسازی فداشدن نانوکامپوزیت‌ها	۱۱۷
نتیجه گیری نهایی	۱۲۰
پیشنهادات برای تحقیقات آتی	۱۲۲

مراجع	۱۲۴
واژه نامه انگلیسی به فارسی	۱۳۳
واژه نامه فارسی به انگلیسی	۱۳۸
ضمایم	۱۴۳
ضمیمه الف- منحنی های XRD نمونه های تهیه شده	۱۴۳
ضمیمه ب- منحنی های تنش- کرنش بدست آمده از آزمون خمش سه نقطه	۱۵۷
ضمیمه ج- زمان سوراخ شدن نمونه های کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی	۱۸۱
ضمیمه د- داده های مربوط به تعیین بالاترین حد بارگذاری خاکرس	۱۸۲
ضمیمه ه- منحنی های مربوط به تحلیل های حرارتی TGA و DSC نمونه های بهینه	۱۸۳
ضمیمه و- منحنی های مربوط به اندازه گیری ظرفیت گرمایی ویژه نمونه های بهینه	۱۸۵
ضمیمه ز- نتایج مربوط به تحلیل عنصری زغال نمونه های کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی	۱۸۹

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱ ساختار شیمیایی ۱:۲ سیلیکات دوست ها عمومی.....	۱۶
جدول ۱-۲ مشخصات رزین فنولیک.....	۴۶
جدول ۲-۲ مشخصات لاستیک NBR.....	۴۶
جدول ۳-۲ مشخصات لاستیک HTPB.....	۴۷
جدول ۴-۲ مشخصات رزین پلی وینیل بوتیرال.....	۴۷
جدول ۵-۲ مشخصات پارچه آزبست.....	۴۸
جدول ۶-۲ مشخصات مونت موریلونیت خارجی اصلاح شده.....	۴۸
جدول ۷-۲ معرفی مواد به کار رفته در سامانه پخت لاستیک های مورد استفاده.....	۴۹
جدول ۸-۲ فرمول بندی سامانه پخت NBR.....	۵۱
جدول ۹-۲ فرمول بندی سامانه پخت HTPB.....	۵۱
جدول ۱۰-۲ فرمول بندی نمونه های نانوکامپوزیتی بر پایه رزین فنولیک.....	۵۷
جدول ۱۱-۲ فرمول بندی نمونه های بر پایه آمیخته رزین فنولیک و رزین پلی وینیل بوتیرال.....	۵۷
جدول ۱۲-۲ فرمول بندی نمونه های بر پایه آمیخته رزین فنولیک و لاستیک NBR.....	۵۸
جدول ۱۳-۲ فرمول بندی نمونه های بر پایه آمیخته رزین فنولیک و لاستیک HTPB.....	۵۸
جدول ۱-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های بسیار پر شده بر پایه رزین فنولیک.....	۷۳
جدول ۲-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های ۷۰phr اصلاح شده با پلی وینیل بوتیرال.....	۷۷
جدول ۳-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های ۷۰phr اصلاح شده با NBR.....	۷۹
جدول ۴-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های ۷۰phr اصلاح شده با HTPB.....	۸۲
جدول ۵-۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های ۵۰phr اصلاح شده.....	۸۴
جدول ۶-۳ خواص مکانیکی و حرارتی نمونه های بهینه در مقایسه با کامپوزیت.....	۹۴

فهرست اشکال

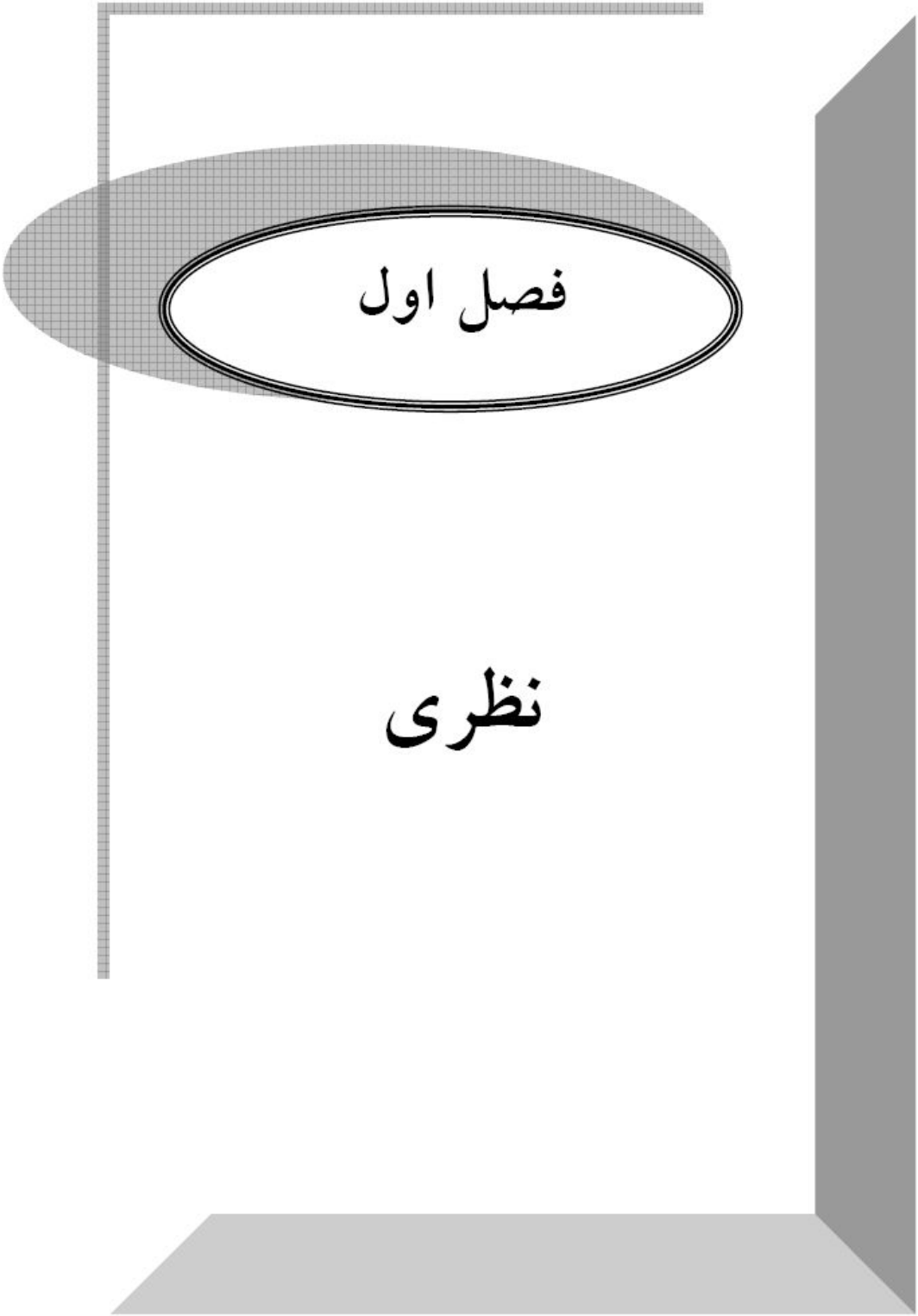
عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ فرآیندهای حفاظت حرارتی عایق فداشونده.....	۷
شکل ۲-۱ اسلوب تشکیل زغال بر روی نانوکامپوزیت های فداشونده.....	۱۲
شکل ۳-۱ ساختار میکرونی مونت موریلونیت.....	۱۶
شکل ۴-۱ فرآیند تبادل کاتیونی بین آلکیل آمونیومها و خاک رس.....	۱۷
شکل ۵-۱ نمایی از ساختارهای مختلف نانوکامپوزیتی.....	۱۸
شکل ۶-۱ نمودارهای XRD.....	۱۹
شکل ۷-۱ نمایی از روش تهیه نانوکامپوزیت فنولیک-خاک رس.....	۲۰
شکل ۸-۱ نمودار فرضی فرآیند فداشدن.....	۳۶
شکل ۹-۱ موازنه جرم و انرژی در فرآیند فداشدن.....	۳۷
شکل ۱۰-۱ مدل سینتیکی احتراق پلیمر.....	۴۲
شکل ۱-۲ قالبگیری به کمک کیسه خلأ.....	۵۴
شکل ۲-۲ استفاده از فشار سنج خلأ متصل به شیر خلأ.....	۵۴
شکل ۳-۲ چرخه پخت نمونه های آزمون.....	۵۶
شکل ۴-۲ نمونه های آزمون خمش سه نقطه.....	۶۰
شکل ۵-۲ نمایی از اجزای آزمون شعله اکسی استیلن.....	۶۲
شکل ۶-۲ نمایی از آزمون اندازه گیری درجه حرارت در ضخامت عایق.....	۶۳
شکل ۷-۲ نمونه آزمون توزیع دما در ضخامت عایق.....	۶۴
شکل ۱-۳ تاثیر میزان خاک رس بر چگالی کامپوزیت آزبست فنولیک و نانوکامپوزیت.....	۶۷
شکل ۲-۳ درصد جامد نمونه های نانوکامپوزیتی.....	۶۸
شکل ۳-۳ طیف XRD مونت موریلونیت.....	۷۰

فهرست علائم و نشانه‌ها

(s^{-1})	ضریب بسامد	A
(s^{-1})	ضریب بسامد تشکیل زغال	A_c
(s^{-1})	ضریب بسامد تشکیل گاز	A_g
$(J.kg^{-1}.K^{-1})$	ظرفیت حرارتی ویژه	C
$(J.kg^{-1}.K^{-1})$	ظرفیت حرارتی ویژه فاز تقویت کننده	C_1
$(J.kg^{-1}.K^{-1})$	ظرفیت حرارتی ویژه پلیمر	C_2
$(J.kg^{-1}.K^{-1})$	ظرفیت حرارتی ویژه زغال	C_3
$(J.kg^{-1}.K^{-1})$	ظرفیت حرارتی ویژه گاز	C_g
$(J.kg^{-1}.K^{-1})$	ظرفیت حرارتی ویژه هوا	C_p
	زغال اولیه	C^1
	زغال ثانویه	C^2
(m)	عرض نمونه در آزمون خمش	C
(m)	ضخامت نمونه در آزمون خمش	D
(MPa)	مدول	E
$(J.mol^{-1})$	انرژی فعال سازی تخریب حرارتی	E
$(J.mol^{-1})$	انرژی فعال سازی تشکیل زغال	E_c
$(J.mol^{-1})$	انرژی فعال سازی تشکیل گاز	E_g
(N)	نیروی اعمال شده بر نمونه در آزمون خمش	F
	تابع تبدیل	$f(\alpha)$
$(J.m^{-2}.K.s^{-1})$	ضریب جابه‌جایی حرارت	h
$(J.kg^{-1})$	آنتالپی ایاف	h_1
$(J.kg^{-1})$	آنتالپی زغال	h_2
$(J.kg^{-1})$	آنتالپی گاز	h_g
$(J.kg^{-1})$	آنتالپی پلیمر	h_p
$(J.kg^{-1})$	آنتالپی گاز داغ محیط	I

	مواد فعال واسطه	I^*
$(J.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1})$	ضریب هدایت حرارت	K
$(J.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1})$	ضریب هدایت حرارت در شرایط اولیه	K_0
(s^{-1})	ثابت سرعت	k
(s^{-1})	ثابت سرعت تشکیل زغال	k_C
(s^{-1})	ثابت سرعت تشکیل گاز	k_g
(s^{-1})	ثابت سرعت تشکیل پلیمر	k_p
(m)	فاصله بین دو تکیه گاه در آزمون خمش سه نقطه	L_0
(kg)	وزن نمونه	m
(kg)	وزن اولیه نمونه	m_0
(kg)	وزن نهایی نمونه	m_f
$(kg.m^{-2}.s^{-1})$	نرخ جرمی ویژه گاز	m_p
	درجه واکنش تخریب حرارتی	n
	ضریب تجربی هدایت حرارتی	n_K
	کامپوزیت	P
(Pa)	فشار گاز	p
(Pa)	فشار استاندارد گاز	p_0
$(J.s^{-1}.m^{-2})$	شار حرارتی اولیه	q_0
$(J.s^{-1}.m^{-2})$	شار حرارتی جابه‌جایی تزریق گازهای ناشی از تخریب حرارتی به لایه مرزی	q_{bl}
$(J.s^{-1}.m^{-2})$	شار حرارتی جابه‌جایی از محیط به سطح	q_e
$(J.s^{-1}.m^{-2})$	شار حرارتی که نمونه به واسطه هدایت حرارت احساس می‌کند	q_K
	منبع گرمای داخلی	Q_p
$(J.s^{-1}.m^{-2})$	شار حرارتی تشعشعی از سطح	q_{rw}
$(J.s^{-1}.m^{-2})$	شار حرارتی جابه‌جایی از سطح داغ به محیط	q_w
$(J.kg^{-1}.mol^{-1}.K^{-1})$	ثابت عمومی گازها	R
(s)	زمان	t

(K)	درجه حرارت مطلق	T
(K)	درجه حرارت انتقال شیشه‌ای	T _g
(K)	درجه حرارت گاز داغ	T _e
(K)	دمای سطح	T _w
	جزء جرمی رزین که به گاز تبدیل می‌شود	V _{gas}
(m)	مسافت	y
	بازده زغال گذاری	y _c
	درجه افت وزن	α
(K.s ⁻¹)	نرخ حرارت دهی	β
	کرنش	ε
(m)	ضریب نشر	ε
	ثابت انبساط	φ
	تابع انتقال لاندا	ζ
	کسر حجمی تقویت کننده	Φ ₁
	کسر حجمی پلیمر	Φ ₂
	کسر حجمی زغال	Φ ₃
	کسر حجمی تخلخل	Φ ₄
	کسر حجمی تخلخل اولیه	Φ ₄ ⁰
	ثابت تشکیل گاز پلیمر	Γ
	ثابت دمش گاز	γ _{bl}
(kg.m ⁻³)	چگالی	ρ
(kg.m ⁻³)	چگالی گاز ناشی از تخریب حرارتی	ρ _g
(kg.m ⁻³)	چگالی تقویت کننده	ρ ₁
(kg.m ⁻³)	چگالی پلیمر	ρ ₂
(kg.m ⁻³)	چگالی زغال	ρ ₃
(J.m ⁻² .K ⁻⁴)	ثابت استفان بولتزمن	σ
(MPa)	تنش	σ



فصل اول

نظری

۱-۱ تعریف مساله

از مهمترین مسایل در صنایع فضایی و هوافضا برای دسترسی به تمامی نقاط کره زمین و نقاط بسیار دور در فضاها، کیهانی، حفاظت حرارتی سازه‌های فضایی و سامانه‌های پرتابی و پرنده در برابر شوکهای شدید حرارتی ناشی از گرمایش ناگهانی است [۱].

دمایی که دماغه سفینه در بازگشت از سفری فضایی با آن مواجه می‌شود حدود 3000 درجه سانتیگراد است. سفینه‌های فضایی در بازگشت از ماه و مریخ به ترتیب با سرعت 11 km/s و $13/72$ km/s وارد جو زمین می‌شوند. انرژی جنبشی در سرعت‌های زیاد مقدار قابل توجهی است و انرژی حاصل از اصطکاک از 100 کیلومتری زمین که فشار برابر 10^{-6} اتمسفر است شروع می‌شود [۲]. لذا اگر این پرتابه‌ها با عایق‌ها و سپرهای حرارتی مناسب محافظت نشوند، قبل از رسیدن به سطح زمین نابود می‌شوند.

روشهای کلی حفاظت حرارتی عبارتند از [۳]:

الف) سپرهای حرارتی نوع فعال

ب) سپرهای حرارتی نوع غیر فعال

سپرهای حرارتی نوع فعال شامل موارد ذیل هستند [۳ و ۴]:

- خنک کردن پوسته - غشایی^۱
- خنک کردن از طریق مایع^۲
- خنک کردن تراوشی^۳
- سپر حرارتی بازتابشی^۴

1. Pellicular
2. Obstracting
3. Transpiration
4. Reradiation

- خنک کردن با استفاده از جریان مانع

سپر های حرارتی نوع فعال در مواقعی که می خواهیم شکل هندسی خارجی سازه پرنده یا اجزای ساختمانی آن را حفظ کنیم به کار می روند و عموماً محدود به سرعت های متوسط ورود به جو هستند (شاتل ها) [۵۳ و ۵]. در این سامانه ها بخش عظیمی از گرمای تشعشی و همرفتی اعمال شده به سطح به صورت بازتابشی از سطح دفع می شود و باقیمانده آن به صورت رسانشی به ماده منتقل می شود.

اما برای مواردی که زمان ورود به جو کم و سرعت ورودی زیاد است استفاده از سپرهای حرارتی غیر فعال ترجیح دارد. در سپرهای حرارتی نوع غیر فعال، تحت تأثیر گرمای آیرودینامیک، لایه سطحی پوشش های تخریب شونده از بین می رود و باعث کاهش شار حرارتی در سطح دیواره محافظ می شود زیرا با تخریب لایه سطحی سپر حرارتی، مقدار زیادی انرژی مصرف می شود [۶ و ۷]. اثر این سامانه حرارتی از طریق مصرف جرم تعیین می شود که ناشی از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی است که در سطح و در لایه مرزی انجام می شود. از جمله نمونه های این عایق ها می توان به کوارتزها، گرافیت ها و مواد کامپوزیت اشاره کرد. به این عایق ها، عایق های فدا شونده نیز می گویند.

محققان نشان داده اند که در شوک حرارتی ناگهانی، استفاده از سپر حرارتی غیر فعال به ویژه کامپوزیت های فداشونده زغال گذار، موثرترین و اقتصادی ترین روش حفاظت حرارتی است [۶ و ۸ و ۹].

اصطلاح فداشوندگی^۱ در مواردی به کار می رود که ماده در اثر گرمایش با آنتالپی زیاد تخریب می شود. در نتیجه تمام فرآیندهای ذوب، تصعید، تبخیر لایه مایع، سوختن، کک شدن و شکستن زنجیره های پلیمری^۲ انجام می شود [۱۰].

در شرایط کاری، خواسته ها و انتظارات اصلی از عایقهای فداشونده به شرح ذیل است [۱۱]:

- ۱- استحکام و مقاومت مکانیکی بالا در درجه حرارت و بسامدهای ارتعاشی بالا.
- ۲- نفوذ حرارتی کم، که مانع انتقال حرارت قبل از موقع، از منطقه تخریب حرارتی به سطح سازه شود.
- ۳- قابلیت تخریب حرارتی و تشکیل محصولات احتراق با ظرفیت گرمایی زیاد، به این معنا که فرآیند تخریب حرارتی با تولید مقدار زیادی کک همراه و به اندازه کافی متراکم است و از نظر مکانیکی آنقدر مقاوم و مستحکم است که می تواند تشعشع موثر و حداکثر جذب حرارت به وسیله محصولات گازی حاصل از تخریب حرارتی را تامین کند.
- ۴- سادگی فناوری ساخت و تولید.
- ۵- در دسترس بودن مواد اولیه.
- ۶- استحکام چسبندگی و پیوستگی بالا با سطح سازه و خود عایق

1. Ablation
2. Depolymerization

۱-۲ کامپوزیت های فداشونده

در فرآیند فداشدن، شارهای حرارتی خارجی توسط مجموعه‌ای از فرایندهای گرماگیر تلف شده، در نهایت خود ماده فداشونده از بین می‌رود [۱۲]. مواد فداشونده درجه حرارت سطح را در محدوده مشخصی نگه می‌دارند به طوری که افزایش شار حرارتی باعث تغییر آن نمی‌شود ولی سرعت پسروری سطح عایق را افزایش می‌دهد. بنابراین، درجه حرارت فداشدن یعنی درجه حرارتی که در آن تخریب حرارتی شروع می‌شود و چگالی از جمله عوامل مهم در انتخاب مواد فداشونده کارا است [۱۱ و ۱۳]. فداشونده‌های زغال گذار از جمله سپرهای حرارتی هستند که امروزه به طور بسیار گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا زغال ناشی از تخریب حرارتی این فداشونده‌ها به عنوان لایه‌ای عایق عمل کرده، در خلال واکنشهای فداشدن از کاهش قابل توجه حجم عایق جلوگیری می‌کند [۱۴]. وقتی فداشونده زغال گذاری گرم می‌شود، دمای سطح آن تا درجه حرارت شروع تخریب حرارتی افزایش می‌یابد، در نتیجه گازهای ناشی از تخریب حرارتی رها و زغال کربنی روی سطح باقی می‌ماند [۱۱ و ۱۳]. در حقیقت حفاظت حرارتی با فداشدن، فرایندهای انتقال جرم و حرارتی است که به صورت خود تنظیم^۱، عایقی متشکل از ناحیه تخریب حرارتی^۲ و زغال با هدایت حرارتی پایین ایجاد می‌کند. ناحیه تخریب حرارتی گازهای ناشی از واکنشهای تخریب را ایجاد کرده، در درجه حرارت‌های بالاتر به زغال تبدیل می‌شود. همچنین بیشترین کاهش جرم در ناحیه تخریب حرارتی اتفاق می‌افتد. وجود ناحیه زغال و دمش گازهای خروجی از ناحیه تخریب حرارتی، نفوذ گرما از سطح و افزایش درجه حرارت لایه‌های داخلی عایق را کنترل می‌کند [۱۵].

به طور کلی فداشدن فرایندی پیچیده است که فقط برخی از پدیده‌های مهم فیزیکی و شیمیایی آن شناخته شده است. در این فرآیند در اثر گرمایش، انرژی جذب شده توسط پلیمر به داخل عایق هدایت می‌شود [۱۶]. نرخ نفوذ گرما بستگی به درجه حرارت سطح عایق دارد و به

1. Self-regulation
2. Pyrolysis